

В. В. ВЕДЕРНИКОВ

**ОПЫТЫ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ ПРЫЖКУ (ПРЫЖОК КАК ПЕРЕХОДНОЙ УЧАСТОК)**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 12 XI 1947)

1. Вопрос об определении высоты прыжка и длины вальца прыжка (как „свободного“, так и „подпертого“) освещался в литературе многими авторами (1-3). Здесь мы остановимся на экспериментальном освещении\* некоторых других сторон явления гидравлического прыжка, понимая, в отличие от других исследователей, под полной длиной прыжка длину участка становления „нормального“ распределения скоростей, начало которого определяется видимым началом вальца прыжка.

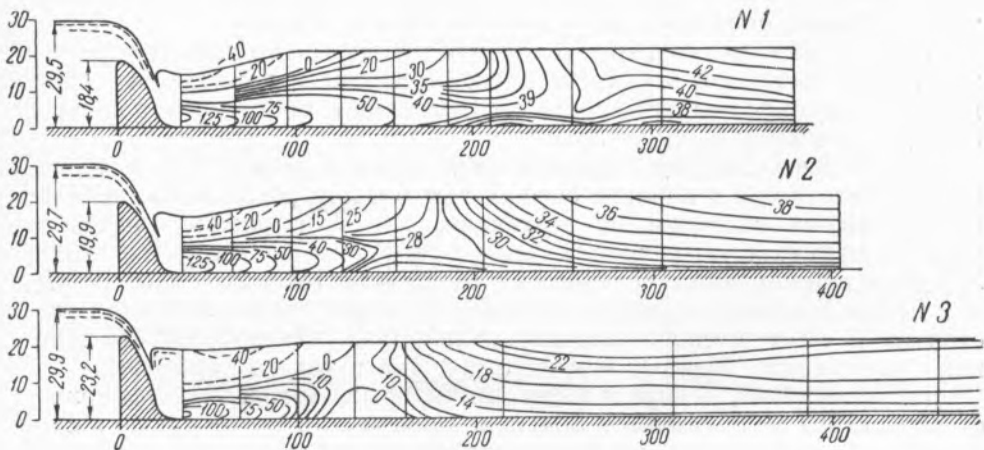


Рис. 1

На рис. 1 (вертикальный масштаб вдвое больше горизонтального) представлены изотакхи в вертикальной плоскости оси лотка в нижнем бьефе водосливных плотин по нашим опытам 1935 г.; (4). Глубина в нижнем бьефе была во всех трех опытах одна и та же, 20,9 см. Полный напор ( $H_0 = H + v_0^2/2g$ ) в верхнем бьефе над дном нижнего бьефа — 30 см.

\* Исследования проводились нами в лотке шириной 51 см и длиной в застекленной части 12 м в лаборатории Московского гидромелиоративного института. В опытах 1935 г. нам помогала лаборант Н. Готуа, а в опытах 1939 — 1940 гг. лаборант В. З. Фонин. Расход воды определялся мерным водосливом, скорости течения измерялись с помощью трубки Пито-Ребока с установкой ее параллельно оси лотка. Очертание профиля водосливных плотин было дано по Кригеру.

Изменение высоты прыжка от опыта к опыту видно на рис. 1, см. также таблицу в статье (4). В опыте № 1 расход равен 42,0 л/сек., в опыте № 2 — 35,3 л/сек. и в опыте № 3 — 18,3 л/сек. На рис. 1 указаны вертикали, на которых производились измерения скоростей (в пяти точках на каждой вертикали, кроме опыта № 1, в котором на длине 210 см от передней грани водослива скорости измерялись в 12—19 точках на каждой вертикали через 1—2 см по высоте).

2. Полученное очертание изотак (рис. 1) позволяет установить в первую очередь факт, что уменьшение скоростей по оси лотка, происходящее в начальном участке течения (под вальцом прыжка и несколько далее), оканчивается не установлением „нормальной“ эпюры скоростей, а идет значительно дальше. После же падения величины максимальной (и средней) скорости течения (на вертикали на оси лотка) до некоторого минимума начинается возрастание скоростей и постепенно вырабатывается „нормальная“ (для оси лотка) эпюра скоростей.

Далее при увеличении высоты водослива и связанного с ним уменьшения (при указанном выше постоянстве  $H_0$ ) расхода и средней по сечению скорости мы видим (рис. 1), что уменьшение скоростей течения по оси лотка доходит в опыте № 3 практически до прекращения течения жидкости на вертикали в конце поверхности вальца. Для выяснения причины этого были проведены наблюдения за состоянием поверхности воды и за пуском краски в воду, позволившие установить, что все движение жидкости в лотке переходит здесь в два винтообразных течения (по одному „винту“ в каждой половине живого сечения прыжка), причем поверхность воды в каждой половине сечения имела в этом опыте весьма ясно выраженный вид „нарезки“ винта. Скорости течения между осью лотка и боковыми стенками поэтому значительно больше скоростей по осевой плоскости лотка.

Таким образом, суждение о течении только по изотактам скоростей вертикальной осевой плоскости лотка приводит к кажущемуся нарушению уравнения непрерывности (или уравнения постоянства расхода), особенно резкому в опыте № 3.

Чем меньше „подперт“ прыжок (чем больше расход при постоянной глубине воды в нижнем бьефе), тем больше абсолютная величина максимума скорости на вертикали, где этот максимум имеет за вальцом наименьшую величину (опыты №№ 2 и 1). Однако и в опыте № 1 даже в поперечных сечениях на расстояниях 185 и 210 см от передней грани плотины скорости течения у боковых стенок лотка (на расстоянии 5 см от стенок) оказались вследствие винтообразности течения существенно больше, чем на оси лотка в тех же сечениях.

Как известно (2, 3), определение длины прыжка как длины поверхностного вальца не показывает большой зависимости ее от средней скорости течения за прыжком (при постоянной глубине за прыжком) (см. также рис. 1). Расстояние же от начала прыжка до места минимума максимальной скорости течения (в осевой плоскости лотка) оказывается, как видно из наших опытов (рис. 1), тем больше, чем больше скорость течения при данной глубине воды, а величина снижения максимума против величины „нормального“ максимума скорости на оси лотка — тем меньше\*.

3. Для дальнейшего разъяснения вопроса о становлении течения в прыжке и о винтообразном течении в нем нами в 1939—1940 гг. был проведен опыт в том же лотке при глубине воды в нижнем бьефе 23,3 см, высоте плотины  $p = 23,1$  см и напоре  $H_0 = 33,0$  см.

На рис. 2 представлены изотакти левой половины поперечных сечений лотка. Скорости в каждом сечении измерялись на вертикалях на

\* Это в известной степени указывает на малое изменение (в пределах опытов) интенсивности накладывающегося на поступательное движение вращательного течения.

расстояниях 2,5; 8,5 и 17 см от стенки лотка и по оси лотка (вертикали показаны на рис. 2). В первых по течению сечениях, включая сечение на расстоянии 1,0 м от напорной грани плотины (при ширине последней по низу 36 см) скорости измерялись на вертикалях в точках через 1 см, в следующих сечениях — через 2 см (через 0,5 см у дна в трех точках и через 1 см у поверхности воды в пяти точках) и от 7,0 м и далее — через 3 см (через 1 см в двух точках у дна и через 2 см в четырех точках у поверхности воды).

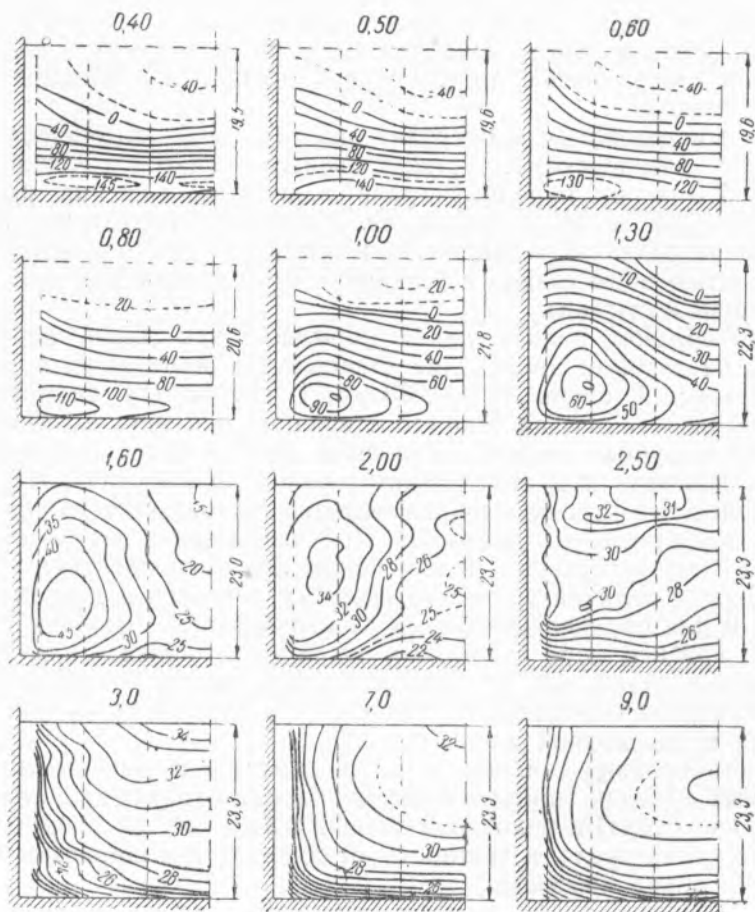


Рис. 2

Горизонты воды на рис. 2 показаны замеренные по оси лотка. После сечения  $x=3,0$  м скорости измерялись далее в сечениях через 1,0 м.

4. Приведенный опыт (рис. 2) позволяет дать еще разъяснение хода становления течения в прыжке и выработке „нормального“ распределения скоростей течения по сечению. Очертание изотох ясно показывает: винтообразность течения, связанное с вращательным движением смещение максимума скоростей с оси сечений, характерное появление двух (в двух симметричных половинах) максимумов скоростей и постепенное перемещение („всплывание“) максимумов скоростей. Видно постепенное зарождение „винтообразного“ движения, развитие и последующее „всплывание“ вихря и „рассеивание“ винтообразного движения до отвечающих „нормальному“ распределению скоростей вторичных течений.

Характерно, что сначала, после вальца и сечения минимума максимальной на оси лотка скорости течения, наибольшая скорость на осевой плоскости лотка оказывается на свободной поверхности, где по мере удаления от начала прыжка эта скорость увеличивается. Это показывают и изотакхи рис. 1 и изотакхи рис. 2. Однако по достижении некоторого максимума вдоль оси лотка скорость на свободной поверхности на оси лотка начинает уменьшаться (рис. 2 и 1 — опыт № 3), и в конце концов максимум скорости оказывается на некоторой глубине под свободной поверхностью (рис. 2,  $x=9,0$  м).

Вторичное после начала прыжка уменьшение максимума (на оси лотка) скорости и затем появление его на некоторой глубине под свободной поверхностью должно иметь причину во влиянии наличия боковых стенок.

Опыт показывает, что очертание изотакх, приближающееся к „нормальному“, базеновскому, устанавливается только с сечения на расстоянии  $7,0$  м от передней грани водослива, или на расстоянии  $7,0-0,36=6,64$  м от подошвы водослива ( $28,5$  глубин или  $54,5$  гидравлических радиуса), а максимум скорости на оси лотка заглублен под поверхностью воды только с сечения  $x=9,0$  м, или  $9,0-0,36=8,64$  м от подошвы водослива.

Таким образом, полная длина „прыжка“ как длина переходного участка, на котором происходит становление нормального распределения скоростей, около  $8,64/0,233=37,1$  глубин (71 гидравлических радиусов нашего опыта). Или это длина порядка, кругло, 40 г л у б и н.

5. Проведенные опыты позволили дать оценку полной длины прыжка, пояснить ход становления течения\* и выяснить, что явление гидравлического прыжка сопровождается наложением на продольное течение вращательного движения. Получающееся в результате винтообразное течение приводит к изменению как распределения давления по сечению и величин градиента скорости у стенок и дна (что существенно и для определения формы размывов русла — особенно у берегов — по крайней мере в обычных нешироких каналах и для расчета крепления и длины его в нижнем бьефе), так и расчетов энергии потока (энергии осредненного течения\*\* и энергии турбулентности) в сечениях вдоль полной длины прыжка.

Ход становления течения, а также характер и интенсивность вращательных течений (причиной возникновения которых является конечная ширина русла) в некоторой степени зависят от геометрической формы сечения русла, в частности, от соотношения ширины и глубины, и течения перед прыжком.

Поступило  
22 X 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. А. Бахметев, О неравномерном движении жидкости в открытом русле, 1928. <sup>2</sup> В. В. Ведерников, Тр. Всес. ин-та гидротехники и мелиорации, 9 (1933). <sup>3</sup> М. Д. Чертоусов, Специальный курс гидравлики, 1937. <sup>4</sup> В. В. Ведерников, Изв. АН СССР, ОТН, № 9 (1942).

\* Это дает оценку также и длины, на которой происходит затухание искусственно возбуждаемой циркуляции.

\*\* Продольного течения и накладывающихся циркуляционных поперечных течений.